



Les granulats recyclés de bétons : un matériau à fort potentiel de valorisation dans les bétons

Sandrine Braymand, Sébastien Roux, Déodonne Kuwufine, Cristian Constantin Mihalcea, Françoise Feugeas, Christophe Fond

► To cite this version:

Sandrine Braymand, Sébastien Roux, Déodonne Kuwufine, Cristian Constantin Mihalcea, Françoise Feugeas, et al.. Les granulats recyclés de bétons : un matériau à fort potentiel de valorisation dans les bétons. Conférence Matériaux 2014 - Colloque Ecomatériau, Nov 2014, Montpellier, France. hal-01144548

HAL Id: hal-01144548

<https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-01144548>

Submitted on 21 Apr 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les granulats recyclés de bétons : un matériau à fort potentiel de valorisation dans les bétons

Sandrine Braymand^{*1}, Sébastien Roux², Déodonne Kuwufine¹, Cristian Constantin Mihalcea, Françoise Feugeas¹, Christophe Fond¹

¹ ICube UMR 7357, 2 rue Boussingault, 67000 Strasbourg, France

² Université de Lorraine, IJL UMR 7198, IUT de Nancy-Brabois dpt GC, Le Montet, Rue du Doyen Urion, CS 90137, 54601 Villers les Nancy, France

* s.braymand@unistra.fr

RESUME : *Le but de cette étude est d'identifier et d'analyser les caractéristiques des granulats recyclés de béton qui influencent les propriétés des bétons à l'état frais et durci. Elle s'inscrit dans une démarche de développement durable permettant le développement de l'utilisation des bétons composés à 100% de granulats recyclés, avec conservation des fines de concassage.*

ABSTRACT: *The purpose of this study is to identify and analyze the characteristics of recycled concrete aggregates that influence the properties of fresh and hardened concrete. It is part of sustainable development issues by promoting the use of concrete composed of 100% recycled aggregates, with preservation of fine elements derived from crushing.*

MOTS-CLÉS : *granulats recyclés, béton, fines, absorption, réactivité*

KEYWORDS: *recycled aggregates, concrete, fillers, absorption, reactivity*

1. INTRODUCTION

Tout au long de son évolution, l'Homme a cherché à développer et choisir ses matériaux en fonction de ses besoins. De nos jours, le secteur de la construction nécessite la mise en œuvre de grandes quantités de matériaux. Parmi ceux-ci et avec 1m³ mis en œuvre par an et par habitant sur la planète [1], le béton est le matériau le plus utilisé au monde. Parallèlement à cela, on assiste à une accélération de la déconstruction d'ouvrages anciens en béton et ainsi à une accumulation importante de gravats stockés majoritairement dans les CET (Centres d'Enfouissements Techniques). Aux regards des évolutions anthropiques, il devient ainsi essentiel de développer de nouvelles approches de la construction permettant de limiter ses impacts environnementaux et de prendre en compte le cycle de vie des matériaux mis en œuvre. Parmi les nombreuses pistes explorées actuellement, la valorisation des matériaux issus de la déconstruction a pour double objectif de préserver les ressources naturelles ainsi que de désengorger les sites de stockage.

Les granulats constituent la matière première principale des bétons en représentant 60 à 70 % de leur volume. Contrairement aux granulats naturels, les granulats recyclés issus de la déconstruction présentent la particularité de contenir du mortier et de la pâte de ciment résiduels qui influencent plusieurs de leurs propriétés, notamment une absorption élevée et induisent la présence de fines en quantité élevée [2, 3]. Ces éléments peuvent se trouver sous forme broyée (éléments fins) ou concassée, accolés ou non au granulat du béton démolé (béton parent) [4, 5]. Les propriétés des bétons réalisés avec ces matériaux recyclés peuvent alors être modifiées [5, 6, 7, 8, 9].

L'étude présentée ici vise à développer l'utilisation de bétons de granulats recyclés en remplacement total des matériaux naturels, des gravillons aux fines. La fabrication de tels bétons nécessite la caractérisation des matériaux recyclés mis en œuvre afin d'en appréhender précisément

l'influence sur les propriétés à l'état frais mais également durci du matériau ainsi élaboré. Pour cela, une étude comparative des variations sur plusieurs lots des propriétés des granulats recyclés est proposée dans cette étude. Les propriétés physiques et mécaniques de différents granulats recyclés en plateforme industrielle ou en laboratoire ont été étudiées puis comparées à celles de deux granulats naturels, roulés et concassés. L'accent a été mis sur les caractéristiques qui sont modifiées par la présence de pâte et de mortier et qui influencent les propriétés des bétons qu'ils constitueront : teneur en éléments fins, réactivité potentielle à l'eau, absorption et résistances mécaniques.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. GRANULATS

Au cours de cette étude, 8 granulats différents ont été utilisés et comparés (cf. Tableau 1). Ils se répartissent comme suit : 2 granulats de références, 4 granulats recyclés en plate-forme dont les compositions initiales sont inconnues et 2 granulats recyclés en laboratoire de compositions connues.

Tableau 1 : Provenance des granulats

| Désignation | GR 1 | GR 2 | GR 3 | GR 4 | GR 5 | GR6 |
|------------------------|---------------------------|------------|------------|--|-------------|-------------|
| Recyclage | Plateforme | Plateforme | Plateforme | Plateforme | Laboratoire | Laboratoire |
| | 1 | 2 | 2 | 3 | béton 2008 | béton 2012 |
| Date de prélèvement | 2008 | 2012 | 2011 | 2012 | 2012 | 2014 |
| (stockage laboratoire) | 2009 | | | | | |
| Désignation | GNR | | | GNC | | |
| Nature | Granulats naturels roulés | | | Granulats naturels concassés | | |
| Provenance | Gravière Alsace | | | Carrière Ile de France (sable) Carrière Ardennes (gravillon et gravier) | | |

Les coupures granulaires d'étude obtenues sur plateforme ou réalisées en laboratoire sont données Tableau 2.

Tableau 2 : Coupures granulaires étudiées

| | GR 1 | GR 2 | GR 3 | GR 4 | GR 5 | GR6 | GNC | GNR |
|---------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| Eléments fins | 0/100 | 0/100 | 0/100 | 0/100 | 0/100 | 0/100 | | |
| μm | 0/500 | 0/500 | 0/500 | 0/500 | 0/500 | 0/500 | 0/500 | 0/500 |
| Granulats | 0/4 | 0/4 | 0/4 | 0/4 | 0/4 | 0/4 | 0/4 | 0/4 |
| mm | 4/8 | 4/8 | 4/8 | 4/10 | 4/8 | 4/10 | 4/10 | 4/8 |
| | 8/13.5 | 8/16 | 8/16 | 10/20 | 8/16 | 10/20 | 6.3/20 | 8/16 |
| | 13.5/20 | 16/20 | 16/20 | | | | | |

2.2. ESSAIS REALISES

La plupart des essais réalisés nécessitent un état sec du matériau. La température de séchage à l'étuve des granulats recyclés a été limitée à 65°C pour ne pas détériorer les constituants de la pâte de ciment durcie (notamment l'ettringite et les CSH) [10].

- Analyse granulométrique,

Cet essai a été réalisé selon la norme NF EN 933-1 [11], sur les différents lots par tamisage par voie sèche sans lavage. Les granulats recyclés contenant du mortier tout autour du granulat parent ne sont pas lavés avant l'essai tel que préconisé dans la norme. Comme les fines seront conservées dans la formulation des bétons et des mortiers, le lavage engendrerait leur évacuation. De plus, la présence de fines et d'éléments réactifs interdit une hydratation préalable.

L'analyse granulométrique par tamisage a été complétée par une étude de la répartition granulaire des éléments fins, par analyse des particules au laser. Les diamètres des particules sont ainsi obtenus par diffraction (théorie de Fraunhofer [12]). Cette analyse est réalisée sur les éléments de fraction inférieure à 500 μm (réalisée en milieu liquide), puis à 100 μm (réalisée en milieu sec). L'analyse successive sur les fractions granulaires étudiées permet d'obtenir les proportions d'éléments fins présents dans les granulats.

- Réactivité à l'eau

L'évaluation de la réactivité à l'eau des matériaux d'étude (granulats et des éléments fins) a été réalisée à partir de deux essais. Ces deux essais sont habituellement réalisés sur pâte de ciment ou mortier pour caractériser les ciments.

Un essai de prise sur les fractions 0/500 μm réalisé selon le protocole décrit dans la norme NF EN 196-3 [13]. Pour cet essai les fines ont été mélangées à l'eau avec un rapport massique eau/fines égal à 0,66.

Un essai de détermination de la chaleur d'hydratation réalisé selon le protocole décrit dans la norme NF EN 196-9 [13], méthode semi-adiabatique. Pour cet essai les sables et gravillons ou les gravillons seuls ont été mélangés à de l'eau de façon à remplir la boîte à mortier du calorimètre de Langavant.

- Coefficient et cinétique d'absorption

La mesure du coefficient d'absorption des granulats naturels a été réalisée en se basant sur le protocole décrit dans la norme NF EN 1097-6 [11]. Préalablement à l'essai les échantillons sont séchés en étuve à $65^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ jusqu'à stabilisation de leur masse, mesurée comme étant la masse sèche.

Après saturation en eau, les échantillons ont été traités afin de permettre la mesure de leur masse à l'état saturé – surface sèche : un dispositif de "tube absorbant" a été développé. Ce dispositif est constitué d'une goulotte inclinée et recouverte de fibres absorbantes à travers lesquelles les granulats se déplacent (Figure 1). La méthode d'obtention d'un état "saturé à surface sèche" a été ainsi adaptée de la norme afin de limiter la perte des éléments fins et l'arrachement du mortier accolé.

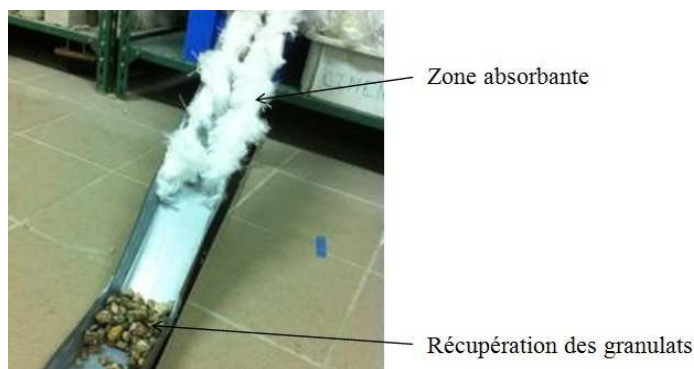


Figure 1 : Tube absorbant

Les essais ont été réalisés sur un échantillon de 1000 g de matériau à l'aide d'une balance de précision 0,1 g permettant un enregistrement régulier des masses à intervalles de 15 secondes ainsi que la réalisation de pesées hydrostatiques. Les échantillons sont placés dans un sceau perforé relié au plateau de la balance et immergé dans l'eau. Les échantillons sont agités après une demi-heure d'immersion pour faciliter l'évacuation des bulles d'air.

- Propriété mécaniques

Les propriétés mécaniques de résistance à la fragmentation et à l'usure ont été déterminées par la réalisation d'essais Los Angeles et Micro Deval selon les normes NF EN 1097-2[11] et NFEN 1097-1 [11] sur les fractions 10/14mm des granulats.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. ANALYSES GRANULOMETRIQUES

Les courbes granulométriques des granulats naturels et recyclés ne présentent pas de différence notable pour les gravillons et graviers. Une différence est observée au niveau de la fraction sableuse où les sables recyclés sont plus grossiers que les sables naturels (fractions 4/8mm et 8/16mm représentées Figure 2).

L'analyse successive des courbes granulométriques obtenues par tamisage sur 0/4mm puis par diffraction laser sur 0/500 μ m et 0/100 μ m renseigne sur les teneurs en éléments fins des granulats (cf. Tableau 3). Ainsi, les proportions d'éléments fins (< 63 μ m) contenus dans la fraction de sable 0/4 mm sont en moyenne 4 fois supérieures pour les granulats recyclés par rapport aux granulats naturels roulés, les granulats naturels concassés ne contiennent presque plus d'éléments inférieurs à 63 μ m.

Il faut également noter que les proportions en éléments fins obtenues à partir des essais aux granulomètres laser (Figure 3) ne concordent pas totalement avec celles obtenues par tamisage. Les résultats obtenus sur les 2 granulomètres laser sur des prélèvements différents sont eux concordants. Les valeurs obtenues par analyse laser sont supérieures à celles obtenues par lecture directe sur la Figure 2. Les limites de l'analyse granulométrique pas tamisage sont ainsi atteintes pour l'utilisation des tamis inférieurs à 300 μ m, surtout avec l'utilisation de granulats potentiellement réactifs à l'eau (formation d'amalgames), une dispersion des grains est nécessaire.

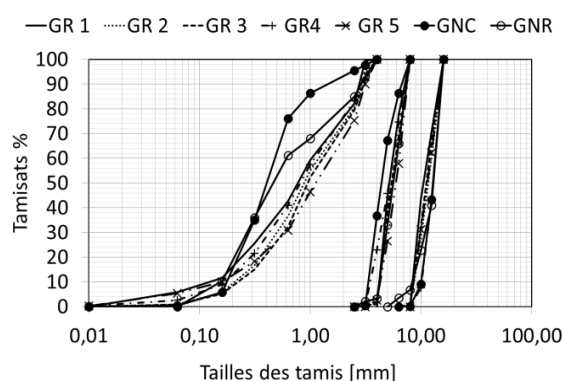


Figure 2 Analyse granulométrique (tamisage)

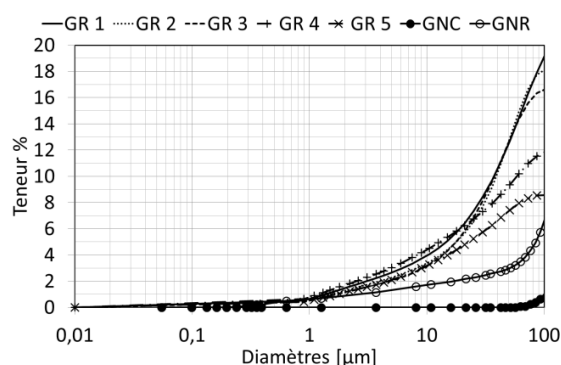


Figure 3 Analyse des particules au laser

L'étude comparative des variations sur plusieurs lots de matériaux recyclés montre que, au regard de l'analyse par tamisage, le lot fabriqué et broyé en laboratoire ne présente pas de différences notables comparée aux lots issus des plates formes ; mais sur les 5 lots étudiés (Figure 2), la teneur en éléments fins (<63 μ m) dans la fraction de sable 0/4 mm présente une dispersion importante (Figure 2 et Tableau 3).

Une analyse de la morphologie de ces granulats est en cours. Elle complètera l'interprétation des courbes granulométriques notamment avec la détermination des surfaces spécifiques des granulats. Des valeurs telles que l'allongement, la circularité, la convexité et la tortuosité des granulats recyclés seront comparées à celles des granulats naturels.

Tableau 3 Teneurs en éléments fins dans le sable 0/4 mm (%)

| | < 63 μ m | <100 μ m | <500 μ m |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|
| Interprétation de la | 0/4 mm | | 0/4mm |
| courbe | 0/500 μ m | 0/500 μ m | |
| granulométrique | 0/100 μ m | | |
| (GR 1- 5) | 3,33 \pm 2,89 | - | 32,09 \pm 4,18 |
| | 11,86 \pm 3,38 | 14,14 \pm 3,65 | - |
| | 12,31 \pm 2,36 | - | - |
| GNC | 0,39 \pm 0,28 | - | 67,74 \pm 0,51 |
| | 0,08 | 1,12 | - |
| | - | - | - |
| GNR | 0,5 | - | 51,5 |
| | 3,51 | 6,85 | - |
| | - | - | - |

3.2. REACTIVITE A L'EAU

Certaines fines recyclées (éléments dont la taille est inférieure à 500 μ m) présentent une réactivité à l'eau. Ainsi 2 lots sur les 6 présentent un durcissement lié à une fin de prise avant 24h (Tableau 4). De plus, l'étude de chacun de ces deux lots à l'aide d'un calorimètre de Langavant a montré un dégagement de chaleur pour la fraction granulaire 0/10 mm contenant des fines ainsi que pour la fraction 4/10 mm dépourvue de fines (Figure 4). La réactivité de ces lots est donc non seulement due aux éléments fins mais également aux éléments plus grossiers.

Tableau 4 Mesure de la prise sur fraction 0-500 μ m

| | GR 1 | GR 2 | GR 3 | GR 4 | GR 5 | GR6 |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------|-----|
| Fin de prise | Pas de prise | Pas de prise | Pas de prise | Pas de prise | 18 | 8 |
| (heure) | | | | | | |

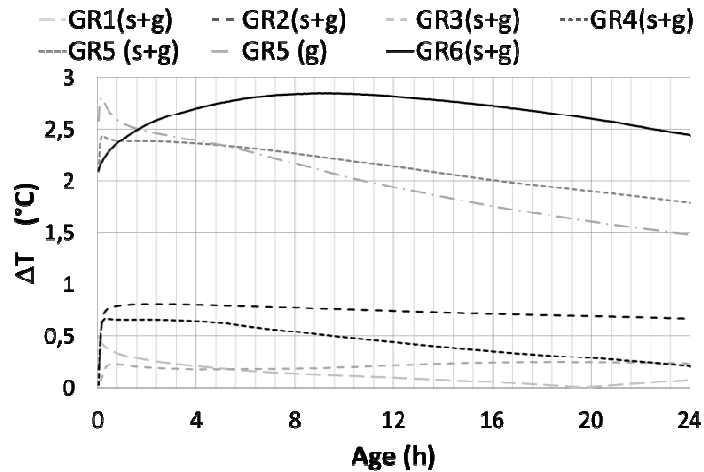


Figure 4: Suivi du dégagement de chaleur des granulats en présence d'eau

On constate que seuls les lots GR5 et GR6 provenant du concassage de bétons fabriqués au laboratoire et conservés uniquement dans des locaux à l'abri des intempéries présentent une réactivité à l'eau même après 6 ans. En ce qui concerne les granulats recyclés issus des plateformes, leur stockage pendant une période indéterminée à l'extérieur a conduit à l'hydratation des éléments anhydres résiduels. Afin d'être représentatif des conditions réelles, il convient donc d'être vigilant à la provenance et au mode de conservation des granulats.

3.3. COEFFICIENT ET CINETIQUE D'ABSORPTION

Les coefficients d'absorption des granulats recyclés sont présentés dans le Tableau 5 et par la Figure 5 en fonction des différentes classes granulométriques.

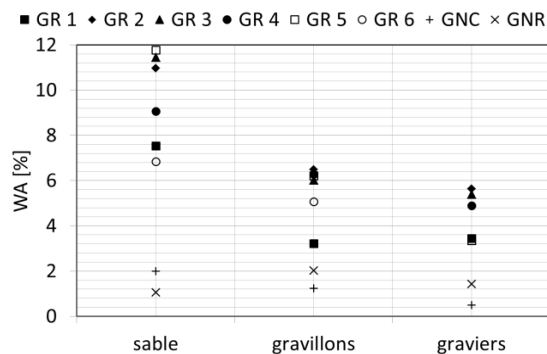


Figure 5 Coefficients d'absorption

| Tableau 5 Coefficients d'absorption % | | | |
|---------------------------------------|--------|-----------|---------|
| Classe granulaire | Sable | Gravillon | Gravier |
| GR 1-6 | 10,16 | 5,89 | 4,69 |
| | ± 1,80 | ± 1,34 | ± 1,02 |
| GNC | 2,00 | 1,23 | 0,50 |
| | ± 0,03 | ± 0,30 | ± 0,04 |
| GNR | 1,06 | 2,03 | 1,43 |
| | ± 0,28 | ± 0,02 | ± 0,06 |

Les résultats de l'étude des cinétiques d'imbibition sont présentés Figure 6. L'agitation des échantillons après une demi-heure d'essai est à l'origine d'une discontinuité de mesure visible sur chacune des courbes.

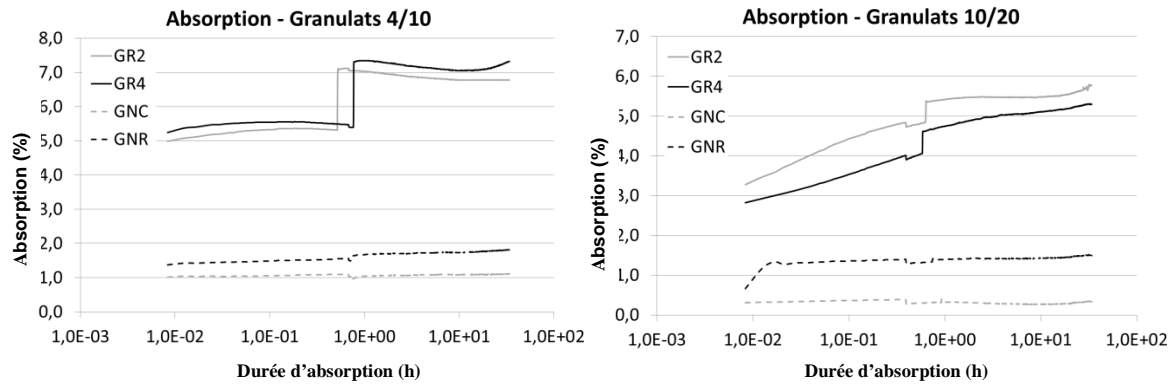


Figure 6 : Suivi de l'absorption des granulats naturels et recyclés

Quelle que soit la granulométrie considérée, les granulats naturels et recyclés montrent des comportements différents. L'absorption des granulats recyclés est nettement plus élevée que celle des granulats naturels : respectivement de 10% pour les sables à 5 % pour les graviers et de l'ordre de 2% au maximum pour les granulats naturels. On constate également une variation sensible de l'absorption en fonction des lots de granulats recyclés analysés mais pour l'ensemble de ces lots, 80 % de l'absorption s'effectue dans les 10 premières minutes. On peut noter que la progression de l'absorption des granulats naturels est constante et n'est que peu impactée par l'agitation. En revanche, on constate que pour les granulats l'agitation entraîne une augmentation significative de la quantité d'eau absorbée.

La présence de mortier et de pâte de ciment dont la porosité à l'eau est plus élevée que celle des granulats naturels induit une quantité d'eau absorbée plus grande pour les granulats recyclés. En effet 80% de l'absorption se produit dans les 10 premières minutes, Tam et al. ont obtenus des résultats similaires [14]. L'importante influence de l'agitation des granulats recyclés sur leur absorption est due à leur morphologie particulière induisant une rétention importante d'air qui est évacuée lors de l'agitation.

Le comportement d'absorption des granulats recyclés apparaît suffisamment différent de celui des granulats naturels pour remettre en cause, pour les granulats recyclés utilisés pour la fabrication de bétons, la notion d'eau efficace (définie dans la norme NF EN 206 [15, 16]) à la base des méthodes classiques de formulation. En effet, on considère habituellement que dans une gâchée, l'eau absorbée par les granulats n'est plus disponible pour l'hydratation des phases cimentaires. De plus, lors de la mise en œuvre des bétons, l'ajout de ciment au contact des granulats est susceptible de créer une désorption locale et donc de modifier cette cinétique d'absorption. Ce phénomène de désorption-réabsorption va faire l'objet d'une étude plus approfondie pour définir précisément son influence lors de la mise en œuvre des bétons, c'est à dire sur l'ouvrabilité du matériau et son maintien de l'ouvrabilité.

3.4. RESISTANCES MECANIQUES

Les granulats recyclés sont en moyenne moins résistants que les granulats naturels mais ils présentent tous des résistances à l'usure et à la fragmentation telles que, au regard de la normalisation en vigueur, ils puissent être considérés comme des granulats pour des bétons hydrauliques. Les résultats sont donnés Tableau 6.

Tableau 6 Résistances à l'usure et à la fragmentation

| | GR1 | GR 2 | GR 4 | GNC | GNR |
|-----------------|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Micro Deval (%) | 14 | 24.7 ± 0.14 | 23.2 ± 2.26 | 21.8 ± 0.85 | 9.9 ± 0.14 |
| Los Angeles (%) | 25 | 26.5 ± 0.74 | 29.9 ± 0.40 | 15.5 ± 0.74 | 20.1 ± 0.25 |

La résistance à la fragmentation (LA) des granulats recyclés restent dans les seuils normatifs (>15%). Cependant, bien que les seuils soient respectés, la perte de matière autour des granulats recyclés peut faire évoluer le squelette granulaire. Les résultats ci-dessous (Figure 7) montrent une évolution du squelette granulaire liée au malaxage uniquement pour les granulats recyclés (GR4). Le granulat naturel (GNC) n'est pas influencé par ce malaxage. Cette évolution du squelette granulaire sera à prendre en compte dans la formulation des bétons.

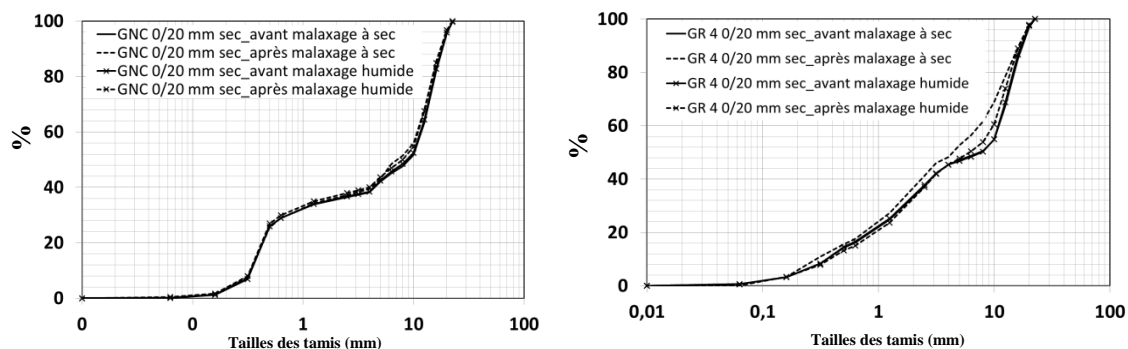


Figure 7 Evolution du squelette granulaire après malaxage : GNC et GR4

4. CONCLUSION

Cette étude a ouvert des perspectives concernant l'approfondissement des connaissances sur les qualités des granulats recyclés. Leur origine implique une réflexion autour, d'une part, de la définition normalisée d'eau efficace et de demande en eau et d'autre part, de la classification des éléments fins.

La grande quantité de ces éléments fins inférieurs à 100 µm ou 63 µm incite à se poser la question de leur conservation et de la façon dont ils seront considérés. Une réflexion devra être menée sur la qualification de la propreté des granulats recyclés, dépendante de la quantification et qualification de ces éléments fins. Ne pouvant être assimilés à des additions calcaires ou siliceuses de par leur composition, il sera nécessaire d'apporter une contribution à l'évolution des normes actuelles.

Les résultats obtenus justifient une analyse fine de l'adaptation des méthodes de formulation pour obtenir des bétons de granulats recyclés de propriétés équivalentes à celles des bétons de granulats naturels. Par la suite, il sera nécessaire de s'intéresser à la mise en œuvre des bétons de granulats recyclés formulés avec des adjuvants. En particulier le recours systématique à la suppression des éléments fins pourra être évité par l'ajout de superplastifiants et permettre ainsi de conserver ces fines qui peuvent avoir un effet bénéfique sur les propriétés mécaniques.

5. REFERENCES

1. Planetoscope, *Statistiques mondiales en temps réel*, www.planetoscope.com/
2. M. Martin-Morales, M.Zamorano, A. Ruiz_Moyano. Valverde-Espinosa, *Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08*, Constr. Build. Mater., 25 (2) (2011) 742-748
3. M.S. De Juan, P.A. Gutiérrez, *Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate*, Constr. Build. Mater., 23 (2) (2011) 872-877

4. R. Sri Ravindrarajah, C.T. Tam, *Recycling concrete as fine aggregate in concrete*, Int. J. Cem. Compos. Lightweight Concr.9 (4) (1987) 235-241
5. L. Evangelista, J.De Brito, *Concrete with fine recycled aggregates : a review*, Eur. J. Environ. Civ. Eng, 8(2) (2014) 129-172
6. D. Duc-Tung, (Multi-) recyclage du béton hydraulique, Thèse de Doctorat Ecole centrale de Nantes (2012), 321 pages
7. V.W. Tam, V., K. Wang, C.M. Tam, *Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis*, J. Hazard. Mater. 152(2) (2008) 703–714.
8. T.C. Hansen, *Recycling of Demolished Concrete and Masonry*, Taylor & Francis (1992), ISBN 0-419-15820-0, 316 pages
9. A.K. Padmini, K. Ramamurthy, M.S. Mathews, *Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete*, Constr. Build. Mater. 23(2) 829–836.
10. LCPC, *Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons*, LCPC-IST (2002), ISBN 2-7208-3406-1, 89 pages
11. AFNOR, *Recueil de normes Granulats*, AFNOR (2011), ISBN 978-2-12-131441-9
12. G. B. J. de Boer, C. De Weerd, D. Thoenes, D., H. W. J. Goossens, *Laser Diffraction Spectrometry: Fraunhofer Diffraction Versus Mie Scattering*, VCH Verlagsgesellschaft MbH, 87(4) (1987) 14–19
13. AFNOR, *Recueil de normes Ciments et chaux*, AFNOR (2013), ISBN 978-2-12-132912-3
14. V.W.Y. Tam, X.F. Gao, C.M.Tam, C. H. Chan, *New approach in measuring water absorption of recycled aggregates*, Constr. Build. Mater., 22(3) (2008) 364–369.
15. AFNOR, *Norme NF EN 206 - Béton - Spécification, performances, production et conformité*, AFNOR (2014)
16. AFNOR, *Norme NF EN 206-1/CN - Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206-1*, AFNOR (2012)